第46卷 第1期
2023年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 1
Jan. 2023

近60 a新疆大气水分亏缺的时空变化特征

姜 萍[1], 胡列群[1], 许婷婷[2]

(1. 新疆维吾尔自治区气象服务中心,新疆 乌鲁木齐 830002;
2. 新疆维吾尔自治区气象台,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 在全球陆地大气水分亏缺(VPD)已经增加、并将持续增强的背景下,新疆大气环境是否趋于干旱化值得探讨。利用1961—2020年地面气象观测资料,采用线性趋势分析、Mann-Kendall检验等方法,研究了新疆VPD的分布及时空演变特征。结果表明:(1) 近60 a来新疆VPD整体呈现显著增加趋势,增幅为0.015 kPa·$(10a)^{-1}$。VPD在2005年发生突变,突变前为弱波动变化,突变后呈增加趋势。(2) 各季节VPD均以增势为主,其中春、夏季增幅较大,冬季增幅最小。春、秋季VPD突变特征与年变化较为一致,夏季略晚(2006年出现突变)。(3) 空间分布上,VPD呈现“山区低、盆地高”的鲜明格局。时空演变分析表明,全疆大范围地区(近83.65%的气象站点)VPD呈增势变化,而VPD呈下降趋势的站点多分布在天山山脉东段的北麓以及南疆盆地的北、西北缘。季节尺度上,春季VPD呈增势变化的站点数占比最高(96.15%),是新疆大气水分胁迫范围最广的时段,而冬季大气水汽含量相较稳定。

关 键 词: 大气水分亏缺(VPD);变化趋势;突变分析;时空演变;新疆

文章编号: 1000－6060(2023)01－0001－10(0001～0010)

大气水分亏缺(VPD)是指在一定温度下饱和水汽压与空气中实际水汽压之间的差值,用以表示大气水分胁迫,是衡量大气干旱程度的有效指标[1-2]。研究发现,大气水分胁迫是影响陆地植被生长的重要气象因素之一[3],相较于土壤水分和大气降水,植物的生理特性与生长状况可能对大气水分胁迫更加敏感[4-6]。最近的一些研究证实,作为植物对大气水分需求的重要驱动因素[7],VPD的增加已经对植被生长及其生产力等产生了显著影响[8-11]。VPD升高可能会触发气孔关闭以防止植物体内水分散失,进而引起植物气孔导度、木质部导水率下降等,造成光合作用和植物生长减弱[12]。同时,高VPD条件下,植物蒸腾速率及其下垫面土壤水分流失速率增加,使植被生长面临更加严峻的水分胁迫,从而限制植物碳吸收及水分利用,引起植被死亡[2,6,13]。可见,VPD的变化对陆地生态系统的结构和功能具有重要意义。

最新研究指出,在气温不断上升而海洋蒸发散量持续降低的协同影响下,全球陆地VPD自2000年以来出现指数形式增长[1-2]。如Yuan等[1]综合CRU、ERA-Interim、HadISDH和MERRA 4个全球气象数据,分析得出全球植被覆盖区域的VPD自20世纪90年代末期出现剧烈增长,超过53%的植被区域VPD增幅大于5%,同时2011—2015年生长季平均VPD比1982—1986年高出11.26%。Grossiord等[2]基于CRU气象数据对1901—2017年全球VPD的变化趋势进行了分析,结果表明在除南美洲北部及其西南部以外的其他区域,VPD均呈现出不同程度的增加趋势。与此同时,全球植被对VPD变化的响应、VPD在决定生态系统生产力和碳通量等方面的重要作用也备受关注。研究指出,VPD的持续性增长会降低全球植被的生长,导致世界范围内初级生

收稿日期: 2022-04-20; **修订日期:** 2022-06-02
基金项目: 新疆维吾尔自治区青年科学基金项目(2022D01B53);新疆气象骨干人才项目资助
作者简介: 姜萍(1989-),女,博士研究生,主要从事气候环境变化与公众气象服务研究. E-mail: jp544867803@126.com
通讯作者: 胡列群(1965-),男,硕士,正研级高级工程师,主要从事气候与遥感技术应用研究. E-mail: hlq1965@163.com

产力的降低，并对全球总初级生产力(GPP)和净生态系统生产力(NEP)产生较大的负面影响[1-2,14]。此外，VPD对全球陆地碳汇以及大气CO_2增长速率的持续而广泛的强调节作用、对森林碳吸收和蒸散作用的限制作用、对中国典型草地生态系统总初级生产力的负向效应影响等也先后得到证实[3-4,10]。综上可见，厘清气候变化下VPD的时空演变特征，对于管理干旱风险、减少预测未来土地碳吸收和气候变化方面的不确定性至关重要。然而，目前有关VPD变化的研究多聚焦在全球或国家尺度上，对中小尺度区域上VPD演变规律的精细化揭示尚有不足。

新疆深居欧亚大陆中心，远离海洋，是中国干旱区的主体。新疆自然环境与气候类型复杂多样，水热分布悬殊，是全球生态系统最脆弱的地区之一，境内植物对水热条件，尤其是水分条件极具依赖性[15]。近半个世纪以来，在全球气候变暖大背景下，新疆气候出现了明显的“暖湿化”转型和“湿干转折”现象[16]，境内平均气温、极端气温显著升高[17-18]，降水量、蒸发量波动增加[17,19]。气温和降水的变化会通过增加饱和水汽压或改变空气相对湿度，引起VPD的变化，进而对地区脆弱的生态系统产生影响。鉴于此，开展对新疆大气水分胁迫分布特征和变化趋势的探讨，将有助于揭示气候转型背景下新疆大气干旱程度的演变规律，为更全面的预估植被生境改变提供参考。因此，本文拟基于地面气象观测数据，计算并评估新疆VPD的分布与演变趋势，以初步实现对新疆大气环境干湿状况的探知。

1 研究区概况

新疆(73°40′~96°18′E，34°25′~48°10′N)位于中国西北边陲，东西距离约2000 km，南北距离约1650 km，总面积约为166×10^4 km^2，是中国主要的干旱半干旱区[20]。“三山夹两盆”的地理环境导致新疆地貌较为复杂，山体、绿洲、盆地交替分布。受地理区位和地形特征的共同影响，新疆属于典型的温带大陆性气候，且气候条件南北迥异。年均气温北疆为−4~9 ℃，南疆为7~14 ℃；年降水量北疆可达100~500 mm，而南疆水资源匮乏，年均降水量多在100 mm以下。总体来看，新疆生态环境极为脆弱，土地荒漠化严重，植被覆盖度低且种类稀少，是全球生态系统与水资源系统最脆弱的地区之一[15]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文所用原始气象观测站点数据来自新疆维吾尔自治区气象信息中心，包括新疆境内105个国家基准气象站1961—2020年气温(TA)、空气相对湿度(RH)月值观测资料。数据已经过严格的质量控制，准确性满足研究需求。另外，剔除连续缺测5 a及以上的台站记录(共计6个)，对于其他存在缺测量的站点，采用多元回归分析法[21]进行插补，以保证观测资料的连续性和均一性。

各气象站点对应的VPD月值序列计算公式如下[10]：

$$\mathrm{VPD}=0.611\times\exp\frac{17.27\times\mathrm{TA}}{\mathrm{TA}+237.3}\times\left(1-\frac{\mathrm{RH}}{100}\right) \quad (1)$$

式中：VPD为大气水分亏缺(kPa)；TA为气温(℃)；RH为空气相对湿度(%)。

对各气象站点计算所得的VPD月值序列进行季度、年度平均，获得各站点VPD季度、年度均值序列；全疆逐年VPD年(季)均值是所有气象站点VPD年(季)均值的平均。

2.2 研究方法

2.2.1 线性倾向估计法 近60 a新疆VPD的年际和季节(春、夏、秋、冬四季)变化趋势采用线性倾向估计法[22]，该方法表达式如下：

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}iX_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}X_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \quad (2)$$

式中：X_i为第i年的VPD年均值；n为研究时段总年份；Slope为一元线性回归系数(斜率)。Slope>0表示VPD随时间呈上升趋势；Slope<0表示VPD呈下降趋势。|Slope|值越大，表示VPD变化幅度越大。

1961—2020年新疆VPD在年、季尺度上的时空演变规律及其变化速率分析同样采用上述方法开展。同时，为保证分析结果的准确和可靠性，以气象站点作为VPD时空演变特征分析的研究单元。

2.2.2 Mann-Kendall检测法 采用Mann-Kendall(M-K)方法[23]检测和提取VPD时间序列中的突变信息，并对比突变前后VPD变化趋势的差异。M-K方法是一种非参数统计检验方法，基本不受异常值和样本分布的影响，且计算简单，既可检测序列的变

化趋势，又能够进行突变点检验，已在水文、气象要素等分析中取得广泛应用[23]。

使用ANUSPLIN软件对气象站点尺度的VPD年均值序列进行空间插值，获得1 km空间分辨率的VPD格网数据，以可视化分析新疆大气干旱状况的空间分布格局。ANUSPLIN是专用气候数据空间插值软件，能够引入高程作为协变量进行气象要素空间插值，因此具有较高的插值精度[24]。研究中季节划分以上年12月—当年2月为冬季，3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季。

3　结果与分析

3.1　新疆VPD的时间变化特征

线性趋势分析表明(图1a)，1961—2020年新疆VPD呈显著增加趋势，趋势率为0.015 kPa·(10a)$^{-1}$。VPD累年平均值为0.771 kPa，其中最大值为0.881 kPa，出现在2008年，最小值为1993年的0.658 kPa。

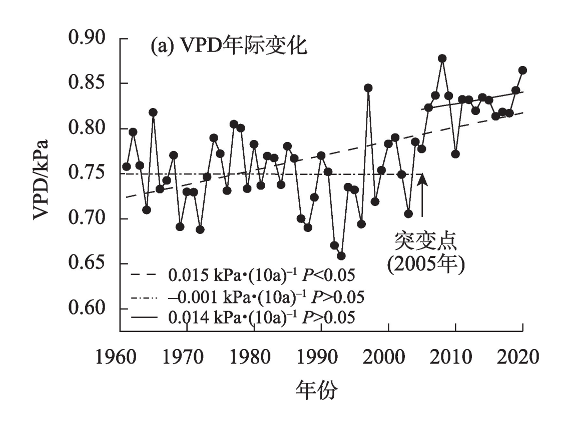
为探讨VPD是否具有阶段性差异，对1961—2020年新疆VPD年均值序列开展M-K突变检验(图1b)，其中UF、UB分别为VPD年均值序列正序、逆序时计算得到的检验统计量。UF>0表明VPD序列呈增加趋势，反之，VPD呈减势变化；若|UF|>|U_α|(U_α为0.05显著性检验水平)则VPD序列变化趋势显著；UF、UB在显著性水平临界值之间的交点即为突变点。由检验结果可见，VPD在2005年发生突变，突变前，VPD呈不显著的波动变化，变化速率为−0.001 kPa·(10a)$^{-1}$；突变后VPD上升速率明显增加，阶段趋势率为0.014 kPa·(10a)$^{-1}$。

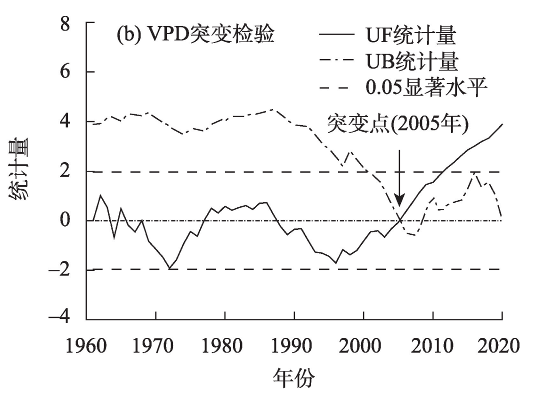
季节尺度上(图2)，VPD季均值由高到低分别为夏季(1.535 kPa)、春季(0.838 kPa)、秋季(0.584 kPa)和冬季(0.126 kPa)。春季VPD最大值、最小值分别为1.076 kPa(2020年)、0.667 kPa(1988年)；夏季VPD最大值、最小值分别为1.780 kPa(2008年)、1.254 kPa(1993年)；秋季VPD最大值、最小值分别为0.683 kPa(1997年)、0.477 kPa(1992年)；冬季VPD普遍低于0.150 kPa。

变化趋势分析表明，各季节VPD均值序列均表现出显著的增加趋势。其中，春、夏季VPD增幅较大，趋势率分别为0.027 kPa·(10a)$^{-1}$、0.022 kPa·(10a)$^{-1}$，冬季增幅最小，变化速率为0.004 kPa·(10a)$^{-1}$。此外，各季节平均VPD也存在一定的阶段性变化，但突变时间略有差异(图3)。由图3可知，2005年是春、秋季VPD增长的突变点，VPD时序由不显著的波动变化转变为逐渐显著的增加趋势；夏季VPD突变时间略晚于春、秋两季，出现在2006年；冬季VPD时序M-K检验中UF、UB统计量具有多个交点，但突变时间并不明显，反映出冬季VPD的不连续性。

3.2　新疆VPD的空间分异特征

3.2.1　VPD年均值空间分布　由基于ANUSPLIN软件的空间插值结果可见(图4)，1961—2020年新疆VPD多年均值空间异质性明显。VPD低值区(VPD<0.5 kPa)主要分布在山区，尤其集中在湿润、半湿润的天山山区及阿尔泰山区，表明上述区域大气水分相较充沛。而南、北疆主要戈壁、荒漠和沙漠地带，因水源匮乏且植被稀疏，VPD普遍较高(VPD>0.7 kPa)，表明上述区域存在不同程度的大气





注：VPD表示大气水分亏缺。下同。

图1　1961—2020年新疆VPD的年际变化与突变检验

Fig. 1　Interannual variation and Mann-Kendall test of VPD in Xinjiang during 1961—2020

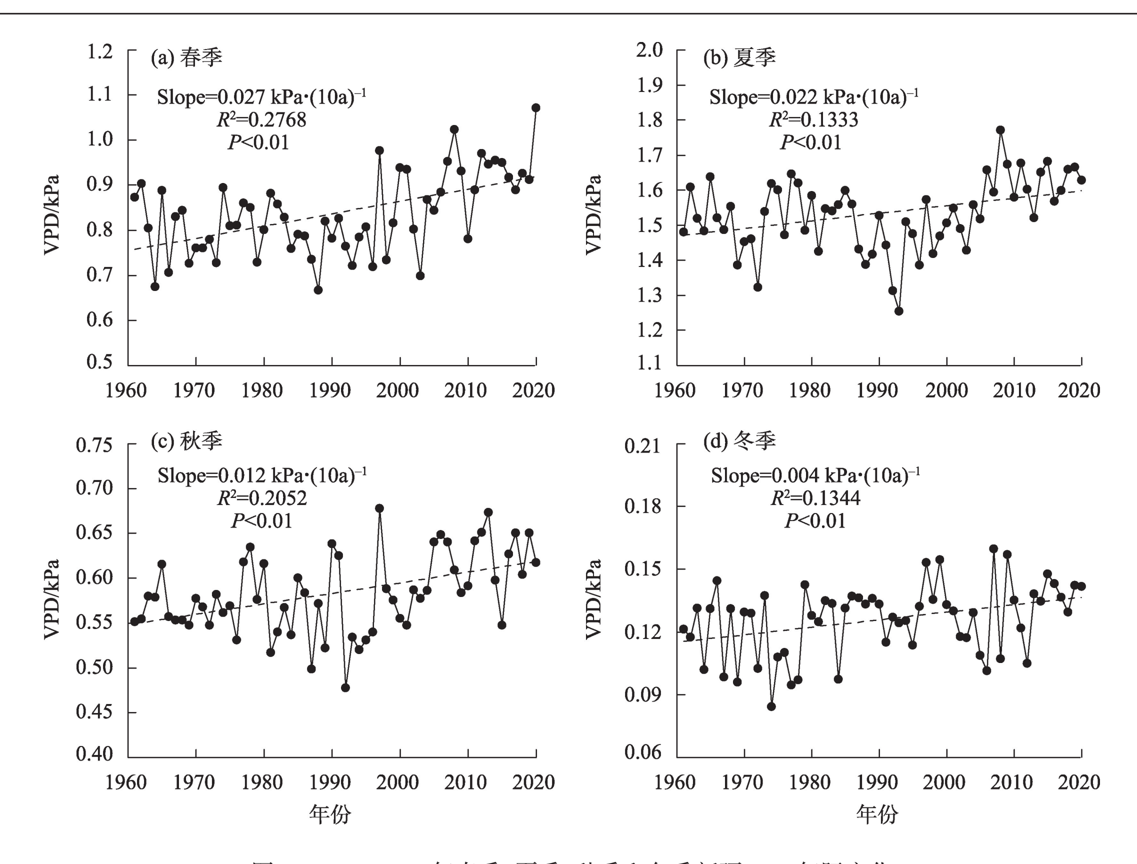


图2 1961—2020年春季、夏季、秋季和冬季新疆VPD年际变化

Fig. 2 Interannual variations of VPD in Xinjiang in spring, summer, autumn and winter during 1961—2020

水分胁迫。山前平原地区VPD多集中在0.5~0.9 kPa之间。

3.2.2 VPD的空间变化特征 从空间格局来看(图5),近60 a新疆VPD年际变化以增加趋势为主,Slope>0的站点数占比达83.65%,且分布在南、北疆的大部区域。其中,VPD呈显著增加趋势(Slope>0, P<0.05)的站点数占总站点数的66.35%(在呈增加趋势的站点中占比79.31%)。这表明研究期间新疆大气干旱程度普遍存在逐渐加剧的态势。VPD呈减势变化的站点占比仅16.35%,零散分布在天山北坡以及南疆盆地北缘,其中有47.06%的站点VPD下降趋势显著。

各季节中,VPD发生增势变化的区域同样远超VPD有所降低的区域(图6),说明新疆大部地区在各个季节均面临着持续加强的大气水分胁迫。春、夏、秋、冬季VPD呈增加趋势的站点数占比分别为96.15%、74.04%、80.77%和80.77%,且通过显著性检验的站点数占比均在60%以上。由此可见,春季是新疆可能受到大气干旱胁迫范围最广的时段,其次为秋、冬季。值得关注的是,在天山山脉东段北缘以及南疆盆地北缘为主的局部地区,VPD在夏季出现"由增转减"的逆转,表明上述区域大气干旱强度在夏季有不同程度的缓解。

综上可见,新疆VPD在空间分布及时空演变上均表现出明显的空间异质性。山区为VPD低值区,荒漠戈壁则多对应于VPD高值;VPD在不同时间尺度上均以增加趋势为主,其中春、夏季增幅较大,冬季最小;在天山山脉东段北麓以及南疆盆地的北及西北缘,VPD出现季节性的增减变化。

4 讨论

4.1 VPD准确性检验

为验证基于气象站点观测资料的VPD计算结果的可靠性,本文获取了英国东安格利亚大学气候研究中心(Climate Research Unit, University of East Anglia, CRU)发布的全球0.5°×0.5°逐月气温(tmp,℃)、实际水汽压(AVP, hPa)格网数据(CRU TS v. 4.05, https://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/),利用ArcGIS软件处理得到1961—2020年新疆气温、实际水汽压月度数据集,并采用文献[25]所

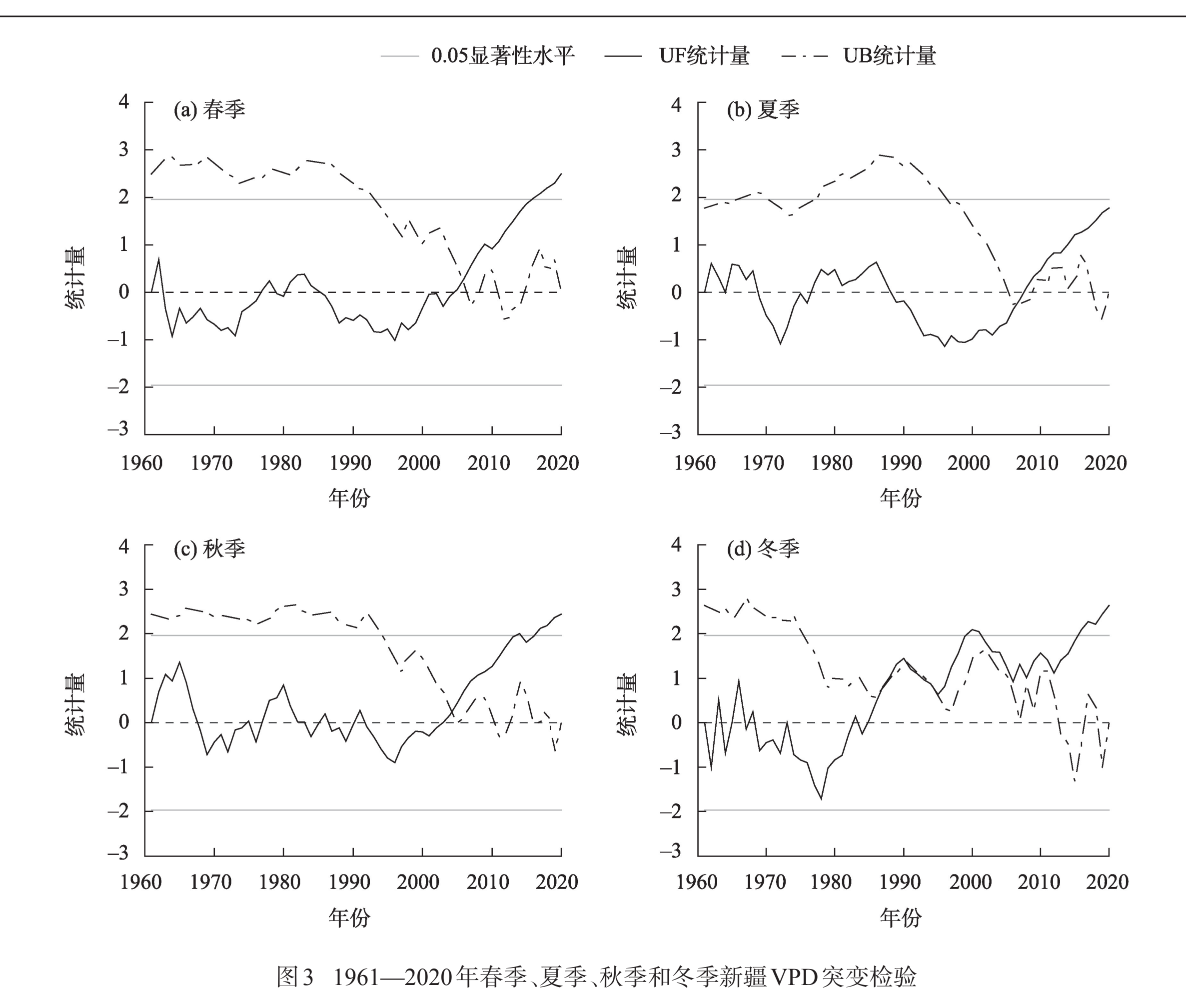
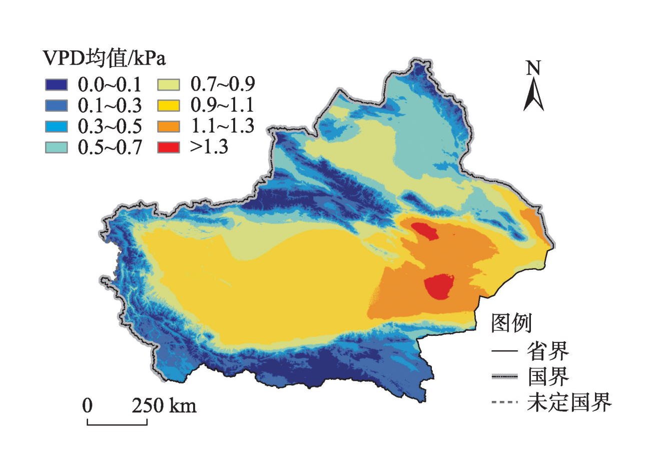


图3 1961—2020年春季、夏季、秋季和冬季新疆VPD突变检验

Fig. 3 Mutation test of VPD in Xinjiang in spring, summer, autumn and winter during 1961—2020



注：该图基于新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)023号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图4 1961—2020年新疆VPD年均值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean VPD in Xinjiang during 1961—2020

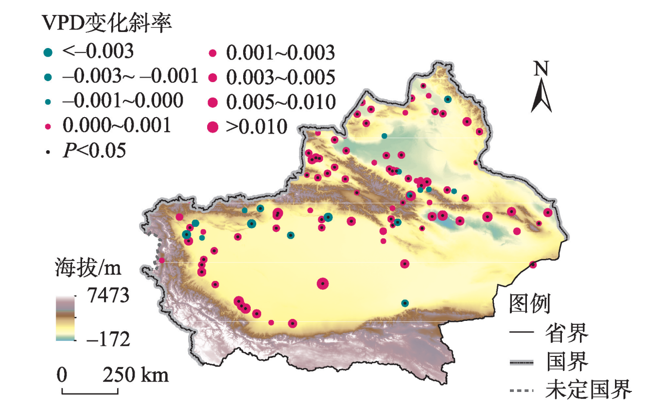


图5 1961—2020年新疆VPD年均值变化趋势

Fig. 5 Change trend of annual mean VPD in Xinjiang during 1961—2020

示方法逐年求得VPD月尺度格点数据，而后对二者的数值及分布格局进行对比（图7）。CRU TS是目前使用最为广泛的气象数据集之一，基于全球气象观测站点资料插值得到，具有较高的准确度[1]。

相关性分析结果（图7a）表明，基于气象站点观测资料（VPD_站点）和CRU气象数据（VPD_CRU）两套气象资料的VPD计算值之间具有良好的线性关系（R^2=0.690且P<0.001）；两套VPD年均值序列的

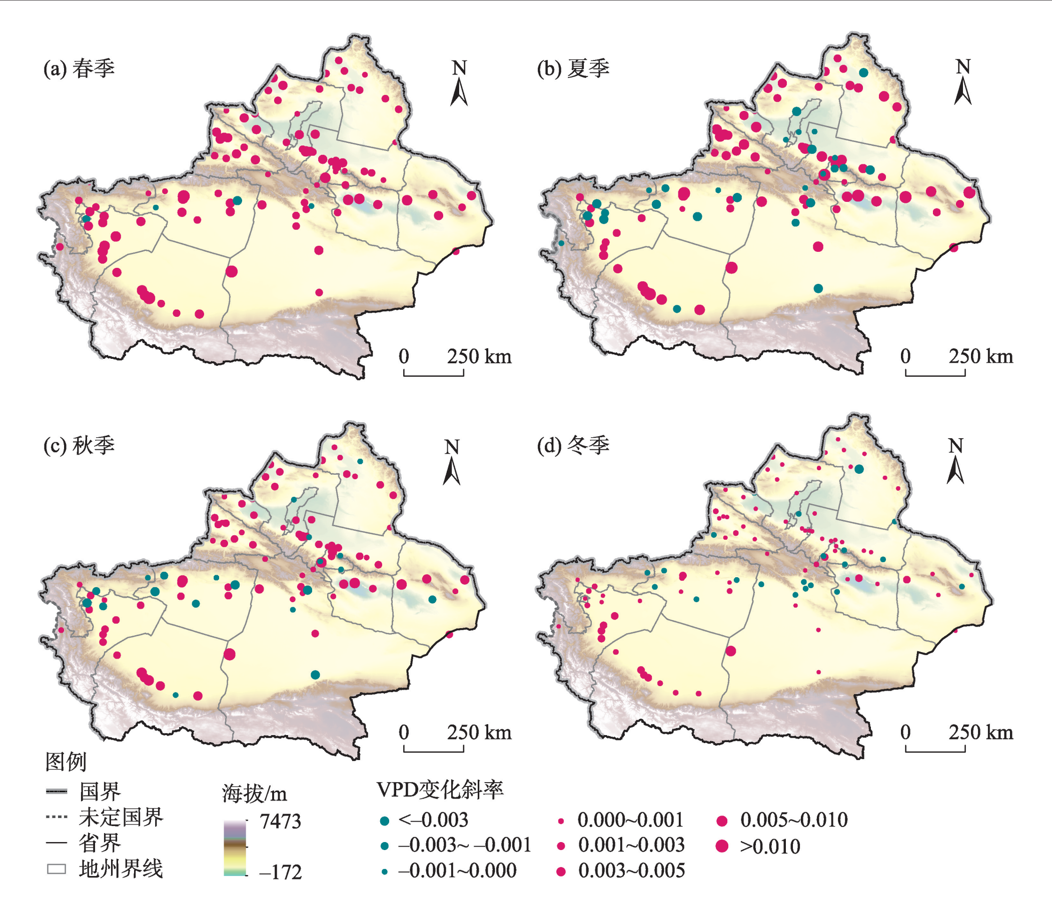
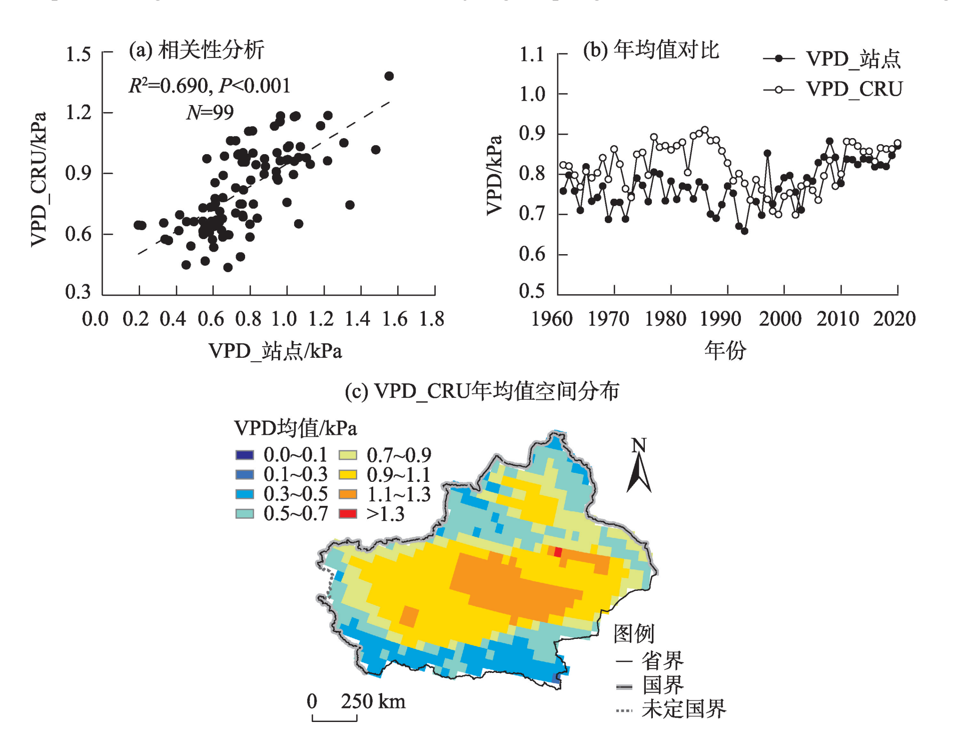


图6 1961—2020年春季、夏季、秋季和冬季新疆VPD时空演变特征

Fig. 6 Spatial-temporal change characteristics of VPD in Xinjiang in spring, summer, autumn and winter during 1961—2020



注：VPD_站点表示VPD计算自气象站点观测资料；VPD_CRU表示VPD计算自CRU气象格网数据；N表示自由度。

图7 基于气象站点观测资料和CRU气象数据的新疆VPD一致性对比分析

Fig. 7 Consistency comparison analysis of VPD based on meteorological station observations and CRU data in Xinjiang

年际变化趋势吻合度较高，特别是近20 a间二者在数值和变化趋势上的差异进一步缩小（图7b）；同时，VPD_站点和VPD_CRU在空间分布特征上具有较高的一致性（图4、图7c），均呈现出山区低、两盆高的鲜明格局。上述对比分析表明，本文基于新疆气象站点观测资料计算所得的VPD序列较为可靠，能够用于地区大气干旱状况的评估。

但是，两套VPD数据也表现出一定程度的差异，如VPD_CRU的年均值在2000年之前普遍高于VPD_站点序列值并且VPD_CRU数据的空间差异性相对较小等。基础数据、处理方法以及空间分辨率等方面的差异可能是引起上述现象的主要原因。

4.2　VPD分布与演变规律

VPD空间分布格局受到地形、土地覆盖类型等的影响。北疆山区降水充沛且植被覆盖度较高，植被的蒸腾作用能够提高大气湿度[26]，使得区域大气水分含量常年较高。同时，高植被覆盖区对地表温度变化的调控作用[26]，也能够通过抑制饱和水汽压的增加进而维持区域VPD的相对稳定。南疆山区以冰雪覆盖为主，气温变暖导致冰雪消融量连续增加[27]，很可能是导致区域大气水分并不匮乏的主要原因。此外，山区较高的植被或冰雪覆盖度能够直接或间接增加地表含水量、持水和保水能力[27-28]，维持地表蒸散量，进而为空气中的水汽提供补给。而南北盆地及其边缘地区主要为戈壁、荒漠和沙漠，植被稀疏，水资源相对或极度匮乏，气温高、降水少、日照和蒸发强烈[29]，空气中相对湿度很小，因此多为VPD高值区。

趋势分析表明，研究期间新疆VPD整体上呈显著增加趋势。全球变暖下，新疆气温有持续且明显的升高[17]，会加速地表蒸散发过程，加剧水分的流失[25]，导致空气湿度降低、VPD增加。但VPD变化也具有明显的阶段性，分析认为，第一阶段（1961—2005年）中，由于同期降水量的增加较大程度上弥补了气温升高对土壤和空气中水分的损耗（图8），使得地区大气水汽含量保持弱波动变化；第二阶段（2005—2020年）中，新疆气温维持高位震荡，但降水量增速大幅降低（图8），“暖湿化”进程减弱并向干旱化突变转型，即发生了“湿干转折”现象[16,30]，降水对地表和大气水汽含量的补充效应明显弱化，以致大气干旱程度逐渐增加。由此可见，新疆的VPD状况与其气候转型之间有密切联系。

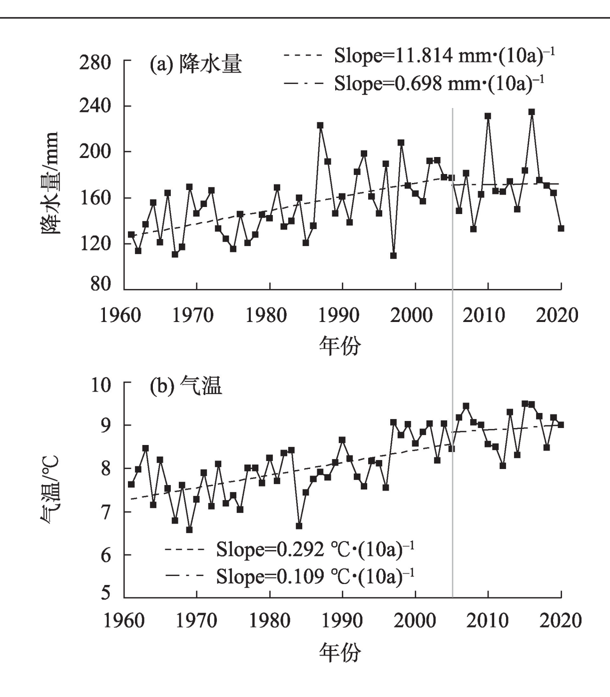


图8　1961—2020年新疆降水量、年均气温的年际变化

Fig. 8　Interannual variations of precipitation and mean annual temperature in Xinjiang during 1961—2020

不同时间、空间尺度上，VPD同样表现出显著增势，这也与新疆境内大范围的干旱化趋势相吻合[16,31]。21世纪以来，新疆南部和东部的干旱频次明显增加，潜在蒸散发加剧[31]，大气水汽来源减少而干旱程度增加。同期天山山区和帕米尔高原等区域趋向“湿化”，以致VPD出现不同程度的降低。时间尺度上，春、夏季VPD增幅较为突出，冬季最弱。已有研究表明，近半个世纪中新疆春、夏季“增温减湿”现象较为普遍，而冬季趋于“冷湿化”[32]。气候的季节性差异将直接影响VPD变化趋势在时间上的异质性。此外，由气候变化引起的其他因素变化，如冰雪消融速度、地表径流量、植被长势变化等，也可能成为VPD演变规律时空差异的潜在影响因子，有待展开深入探讨。

5　结　论

本文基于气象站点观测资料，对1961—2020年新疆VPD的分布特征及其时空演变规律进行了分析，主要结论如下：

（1）近60 a中新疆VPD呈现明显的增加趋势，变化趋势率为0.015 kPa·(10a)$^{-1}$。VPD在2005年发生突变，突变前VPD呈弱波动年际变化，突变后呈持续增加趋势。VPD季均值由高到低分别为夏季>春季>秋季>冬季。各季节平均VPD虽有阶段性变

化，但仍以增势为主，其中春、夏季VPD增幅较大，趋势率分别为0.027 kPa·$(10a)^{-1}$、0.022 kPa·$(10a)^{-1}$，冬季增幅最小。

（2）新疆VPD的空间分布和时空演变趋势均具有空间异质性。山区VPD普遍偏低，而VPD高值主要集中在南、北疆戈壁、荒漠及沙漠地带。约83.65%的气象站点VPD表现出增加趋势，仅天山山脉东段北麓以及南疆盆地的北、西北缘等局部地区VPD有所下降。春季大气水分胁迫增加最为广泛，VPD呈增加趋势的站点数占比高达96.15%，冬季则相对稳定。

（3）对比分析表明，本文VPD计算结果具有较高的可靠性。土地覆盖类型、植被覆盖度、阶段性气候转型、气候条件的区域化差异，以及由气候变化引起的冰川、地表径流等方面变化，可能是导致新疆VPD空间分布和演变规律出现异质性的潜在因素。

参考文献（References）

[1] Yuan W, Zheng Y, Piao S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396, doi: 10.1126/sciadv.aax139.

[2] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit[J]. New Phytologist, 2020, 226(6): 1550–1566.

[3] He B, Chen C, Lin S R, et al. Worldwide impacts of atmospheric vapor pressure deficit on the interannual variability of terrestrial carbon sinks[J]. National Science Review, 2022, 9(4): nwab150, doi: 10.1093/nsr/nwab150/6355462.

[4] Sulman B N, Roman D T, Yi K, et al. High atmospheric demand for water can limit forest carbon uptake and transpiration as severely as dry soil[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(18): 9686–9695.

[5] Konings A G, Williams A P, Gentine P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4): 284–288.

[6] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1023–1027.

[7] Rawson H M, Begg J E, Woodward R G. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species[J]. Planta, 1977, 134(1): 5–10.

[8] Carnicer J, Barbeta A, Sperlich D, et al. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 409, doi: 10.3389/fpls.2013.00409.

[9] Restaino C M, Peterson D L, Littell J. Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(34): 9557–9562.

[10] 孟莹, 姜鹏, 方缘. 大气水分亏缺对中国两种典型草地生态系统总初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3633–3642. [Meng Ying, Jiang Peng, Fang Yuan. Contrasting impacts of vapor pressure deficit on gross primary productivity in two typical grassland ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3633–3642.]

[11] Konings A G, Williams A P, Gentine P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4): 284–288.

[12] Running S W. Environmental control of leaf water conductance in conifers[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1976, 6(1): 104–112.

[13] Bai Y, Liu Y, Kueppers L M, et al. The coupled effect of soil and atmospheric constraints on the vulnerability and water use of two desert riparian ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 311: 108701, doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108701.

[14] Zhang Y, Song C, Band L E, et al. No proportional increase of terrestrial gross carbon sequestration from the greening earth[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(8): 2540–2553.

[15] 庞静, 杜自强, 张霄羽. 新疆地区植被对水热条件的时滞响应[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(7): 82–88. [Pang Jing, Du Ziqiang, Zhang Xiaoyu. Time-lagged response of vegetation to hydro-thermal factors in Xinjiang region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(7): 82–88.]

[16] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57–72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57–72.]

[17] 王娜, 牛婷, 文方, 等. 新疆1982—2015年植被变化及气候影响因素分析[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(3): 28–34. [Wang Na, Niu Ting, Wen Fang, et al. Analysis of vegetation variations and climate influencing factors in Xinjiang from 1982 to 2015[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2020, 42(3): 28–34.]

[18] Wang B L, Zhang M J, Wei J L, et al. Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China, during 1960—2009[J]. Quaternary International, 2013, 298: 141–151.

[19] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10): 946–952.

[20] 贺可, 吴世新, 杨怡, 等. 近40 a新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1333–1340. [He Ke, Wu Shixin, Yang Yi, et al. Dynamic changes of land use and oasis in Xinjiang in the last 40 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1333–

1340.]

[21] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 28−30, 130−139. [Huang Jiayou. Meteorological statistical analysis and prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 28−30, 130−139.]

[22] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220−1230. [Jiao Wenhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220−1230.]

[23] 韩艳莉, 于德永, 陈克龙, 等. 2000—2018年青海湖流域气温和降水量变化趋势空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 999−1009. [Han Yanli, Yu Deyong, Chen Kelong, et al. Spatial distribution characteristics of temperature and precipitation trend in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 999−1009.]

[24] 刘志红, Li Lingtao, Tim R. McVicar, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92−100. [Liu Zhihong, Li Lingtao, Tim R. Mcvicar, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92−100.]

[25] Zhang T Y, Chen Z, Zhang W K, et al. Long-term trend and interannual variability of precipitation-use efficiency in Eurasian grasslands[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108091, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108091.

[26] 程丹妮, 王颖琪, 程勇翔, 等. 新疆典型沙漠和绿洲植被−水汽−地表温度相关性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 456−466. [Chen Danni, Wang Yingqi, Cheng Yongxiang. Vegetation-water vapor-landsurfacetemperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 456−466.]

[27] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513−527. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513−527.]

[28] 李海霞, 杨井, 陈亚宁, 等. 基于MODIS数据的新疆地区土壤湿度反演[J]. 草业学报, 2017, 26(6): 16−27. [Li Haixia, Yang Jing, Chen Yaning, et al. Retrieval of soil moisture information in Xinjiang using MODIS[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(6): 16−27.]

[29] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27−34. [Wu Xiulan, Zhang Taixi, Wang Hui, et al. Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang during 1961—2017[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(4): 27−34.]

[30] Guan X, Huang J, Guo R, et al. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 12669, doi: 10.1038/srep12669.

[31] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1498−1511. [Yao Junqiang, Chen Jing, Tuoliwubieke Dilinuer, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1498−1511.]

[32] 宋佳, 徐长春, 杨媛媛, 等. 基于MODIS16的新疆干湿气候时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 210−221. [Song Jia, Xu Changchun, Yang Yuanyuan, et al. Temporal and spatial variation characteristics of evapotranspiration and dry-wet climate in Xinjiang based on MODIS16[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 210−221.]

Spatiotemporal variations of vapor pressure deficit in Xinjiang in recent 60 years

JIANG Ping[1], HU Liequn[1], XU Tingting[2]

(1. Xinjiang Meteorological Service Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Research has confirmed that the global terrestrial vapor pressure deficit (VPD) has already increased and will continue to increase. In this context, it is worth exploring whether the atmospheric environment in Xinjiang of China tends to be drier. The VPD series of Xinjiang from 1961 to 2020 was calculated based on meteorological observation data. Then, the distribution and spatio-temporal evolution characteristics of VPD were studied by linear trend analysis, Mann-Kendall test, etc. The results are as follows: (1) From 1982 to 2015, the average annual VPD in Xinjiang exhibited an obvious upward trend with an increased rate of 0.015 kPa·$(10a)^{-1}$. As shown in the Mann-Kendall test, an abrupt change in VPD occurred around 2005, and a weakly fluctuating change was observed before the mutation, followed by an increasing trend. (2) There were significant differences in the intensity of VPD in different seasons, but increasing trend changes, even though the rates of increase differed, which appeared in the series of mean VPD values for each season. In comparison, the magnitude of increase in VPD sequences was greater in spring and summer and the smallest in winter. The characteristics of abrupt changes in VPD sequences in spring and autumn were relatively consistent with the changes in the annual VPD value series, whereas summer was slightly later, with the abrupt change that occurred in 2006. (3) Spatially, VPD exhibited a distinct difference of "low in the mountains and high in the basins", and there was spatial heterogeneity in its long-term evolution trend. A large area of the entire territory (approximately 83.65% of the meteorological stations) exhibited an increasing trend in VPD, whereas the stations with decreasing trends were mostly distributed in the northern foothills of the eastern part of the Tianshan Mountains and the northern/northwestern edge of the south Xinjiang Basin. On the seasonal scale, the number of meteorological stations with increasing trend changes in VPD in spring accounted for the highest proportion of the total number of stations (96.15%), indicating that this season is the most extensive period of VPD in Xinjiang. Comparatively, the relatively small variation of the VPD time series showed that the atmospheric dryness during winter in Xinjiang was relatively stable in the long term. This study reveals the evolution of VPD in Xinjiang under a significant shift from warm-wet to warm-dry and serves as a reference for reducing uncertainties in the prediction of changes in ecosystem structure and function.

Key words: vapor pressure deficit (VPD); variation trend; abrupt change analysis; spatial-temporal evolution; Xinjiang